

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА КАПЕЛЬ С ПОМОЩЬЮ СЧЕТНО-ИМПУЛЬСНОГО И ИНЕРЦИОННОГО МЕТОДОВ

В связи с тем что в литературе отсутствуют данные о сравнении результатов, полученных счетно-импульсным методом, с данными, определенными опробированными методами, рекомендуется относиться к счетно-импульсному методу критически, так как «надежность метода измерения еще не определена» [2]. Правда, Викс и Даклер [1] показывают, что найденные ими экспериментальные значения максимального диаметра капель лежат внутри области, ограниченной кривыми, соответствующими (при данных скоростях газа) верхнему и нижнему пределу критического числа Вебера. Не касаясь достоверности соотношения скоростей газа и капель, выбранных при расчете их устойчивых размеров, а также, не рассматривая вопрос о том, что число Вебера не является однозначным критерием устойчивости, необходимо отметить, что очевидная условность понятия максимальный диаметр, который представляет собой в общем случае величину стохастическую, не может служить основанием для проверки работоспособности метода измерения.

Как известно, при распыливании жидкости процесс образования капли того или иного размера подчиняется статическим закономерностям. В связи с тем что дисперсный состав капель оценивается на основании частичной выборки, результаты измерения характеризуют генеральную совокупность капель со степенью надежности, зависящей от объема используемой выборки. К тому же определение размеров капель производится с погрешностью, величина которой обусловлена спецификой применяемого метода измерения.

Таким образом, данные о дисперсном составе капель, найденные разными методами на одном объекте измерения, неизбежно будут отличаться. В качестве критерия их сравнения должен быть выбран параметр, наиболее полно характеризующий некоторую количественную сторону процесса, в котором участвует распыленная жидкость. Для процессов тепломассообмена таким критерием, на наш взгляд, является удельная поверхность капель, т. е. поверхность, приходящаяся на единицу их массы.

Нами сопоставлены результаты, полученные счетно-импульсным методом [3] и методом улавливания капель [4, 5]. Чтобы сравнение было правомочным, необходимо измерять обоими методами дисперсный состав капель в одной и той же зоне, расположенной в мерном сечении капельного потока. С этой целью положение отборного устройства и кюветы относительно корпуса (рис. 1), а следовательно, и относительно зоны измерения фиксировалось установочными штифтами. После отбора пробы кюветы, выполненная из оргстекла, закреплялась штифтами на прозрачной пластинке, на которой были размечены прямоугольные участки размером $5,4 \times 6$ мм, что при фотографировании соответствовало величине кадра на фотопленке. Исследуемая зона состояла из двух таких участков. При переносе кюветы расположение в ней собранных капель не нарушалось.

Кроме того, предварительно устанавливали концы электродов датчика в некоторую исходную точку с помощью отвеса. Место крепления отвеса подбиралось так, чтобы при его опускании оставался отпечаток в вязком слое в нужной точке кюветы. Затем на место отборного устройства вводился зонд-датчик и концы электродов подводились под острие отвеса. Дальнейшее перемещение зонда от исходной точки в двух направлениях осуществлялось координатником.

Собранные капли фотографировали в проходящем свете фотокамерой «Зенит-3м». Для увеличения пользовались микроскопом типа МПБ-2. При этом можно было различать капли размером 20 мкм и более. Во время обработки негативов 1 мм размера капель проектировался в 50 мм. Точность отсчета, обусловленная четкостью изображения капли, составляла 5 мкм. Применение микроскопа с еще большим увеличением (например, типа МБУ) для фотографирования проб капель, характеризующихся существенной полидисперсностью, нецелесообразно: значительно уменьшаются поле зрения и глубина резкости, так что одновременно получать контрастные изображения крупных и мелких не удавалось. Хотя при большом увеличении различаются капли размером значительно меньше 20 мкм, однако для исследуемого капельного потока их вклад по массе в суммарный расход оказался менее 0,2%. Поэтому использовали микроскоп типа МПБ-2 с разрешающей способностью 20 мкм.

При изготовлении экспериментальной установки и измерениях учитывались рекомендации авторов, использовавших метод улавливания в качестве основного метода исследования. Например, данные о том, что согласно скоростной киносъемке капли размером 0,25—0,8 мм в области скоростей 5—7 м/сек при ударе о твердую поверхность (без покрытия) не дробились [4]. В работе [5] частицы диаметром до 0,3 мм, образованные при помощи генератора одиночных капель, разгонялись до скорости 25 м/сек. Затем капли улавливались на подложку, покрытую вязким слоем и их размеры сравнивались с данными, полученными скоростной киносъемкой. При этом дробления капель при ударе не обнаружива-

лось. Можно считать, что метод улавливания без особых ограничений применим для капель размером до 500 мкм при скорости их движения до 15 м/сек.

Чтобы снизить скорость капель и дополнительно уменьшить их размеры, применялась металлическая сетка с ячейкой $0,5 \times 0,5$ мм (рис. 1), что обеспечивало большую однородность дисперсной структуры в зоне потока. Нами экспериментально обнаружено, что крупные капли могут разрушаться, если покрытие имеет большую вязкость, — на поверхности остаются пустые лунки, окруженные цепочкой осколков. В связи с этим подбирали вязкость покрытия, изменяя соотношения количества вазелина и трансформаторного масла так, чтобы не было дробления капель.

При организации капельного потока геометрические размеры форсунки и расстояние до зоны измерения были таковы, что в зоне измерения происходил небольшой локальный расход жидкости (порядка $0,1\text{--}0,2$ мм³/мм² сек). Это исключало применение быстродействующего затвора, который может исказить локальные спектры размеров капель. В случае натекания дисперсного потока на заборное устройство часть мелких капель вместе со спутным потоком воздуха может отклоняться от направления прямолинейного движения и не попадать в исследуемую зону. Как известно, эффективность инерционного осаждения капель характеризуется коэффициентом улавливания. Однако в связи с трудностями, возникающими при определении полей скоростей капель и эжектируемого потока воздуха вблизи препятствия, поправка на коэффициент улавливания не вводилась. Одной из особенностей инерционного метода является возможное несоответствие измеренных диаметров капель и действительных их размеров из-за отличия от сферической формы капель, собранных в вязкий слой.

По данным [5], измеренные диаметры превышают действительные размеры капель, относительная погрешность измерения в исследованном диапазоне размеров ($0,1\text{--}0,3$ мм) составила величину порядка 3—17%.

В наших опытах температура распыливаемой воды отличалась от температуры окружающего воздуха не более чем на 2—3°C. Тем самым возможное испарение капель сводилось к минимуму. Кроме того, в результате фотографирования одной и той же пробы через некоторые промежутки времени было установлено, что

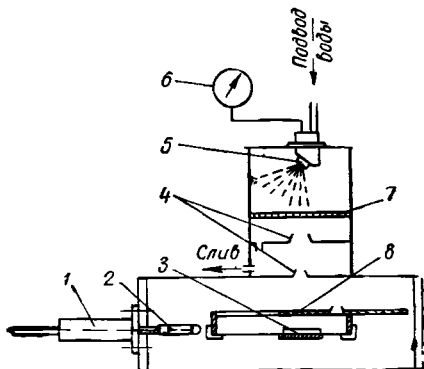


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — координатник; 2 — зонд-датчик; 3 — кювета (подложка); 4 — отсекатели; 5 — форсунка; 6 — манометр; 7 — сетка; 8 — отборное устройство.

для капель диаметром 20 мкм и более погрешность измерения их размеров в результате испарения за время, необходимое для фотографирования (30—50 сек), меньше погрешности отсчета размеров капель.

Из данных измерений следует, что погрешность в оценке диаметра капель с помощью инерционного метода составляла 5—7%. Причины погрешностей, а также их величина зависят от диаметра измеренных частиц. Достоверность результатов по методу улавливания обуславливается объемом выборки, т. е. количеством собранных и обмеренных капель, необходимым для определения характеристик дисперсного состава всей совокупности капель, проходящих через исследуемую зону. Для этого можно воспользоваться таблицей достаточно больших чисел, применяемой в математической статистике [6].

Если задавать величину вероятности $P=0,95$, выражающую степень надежности результатов, получаемых на основе частичной выборки и распространяемых на дисперсный состав общей совокупности капель, и назначить допустимую ошибку ϵ , равную 0,05, то достаточно большое число капель равно 384.

Следует отметить, что при статическом анализе «наблюдения должны производиться в одинаковых условиях» [6]. Применительно к диспергированию это означает, что условия образования капель должны быть стационарны во времени либо время отбора пробы должно быть намного больше периода возможных флуктуаций процесса каплеобразования. При этом результаты флуктуаций в объеме выборки будут достаточно сглаженными. Мы делали три контрольных отбора. Количество обмеренных капель соответственно равно 893, 983 и 716. Установлено, что такая характеристика, как удельная поверхность капель, определенная для каждой из трех проб, отличается от вычисленной по суммарному числу капель, содержащемуся в трех пробах не более чем на 15%, т. е. погрешность находится в пределах точности самого метода и дальнейшее увеличение объема выборок, по-видимому, нецелесообразно.

Обработкой негативов было выявлено число капель n_j , приходящихся на каждый интервал размеров $D_j \pm \Delta D_j/2$. Значения функции плотности распределения объема капель по диаметру находили из уравнения

$$v(D_j) = \frac{n_j \bar{D}_j^3}{\Delta D_j \sum_{j=1}^m n_j \bar{D}_j^3}, \quad (1)$$

где m — число интервалов во всем спектре размеров.

Интегральную функцию $V(D)$ можно рассчитать из выражения

$$V(D_k) = \sum_{j=1}^k v(\bar{D}_j) \Delta D_j. \quad (2)$$

На рис. 2 показаны гистограмма значений $v(\bar{D}_j)$ (кривая 2) и график функции $V(D)$ (кривая 4), построенная по результатам обработки одной из проб.

В мерном сечении капельного потока исследуемый участок, имеющий форму прямоугольника, был выбран таким образом, чтобы одна его ось x располагалась перпендикулярно к радиусу факела форсунки (рис. 1). Судя по контрольным измерениям, в этом направлении дисперсный состав капель (т. е. $v(D)$) и локальный удельный расход жидкости g практически не изменялись. Поэтому с помощью счетно-импульсного метода локальные измерения производились только вдоль второй оси участка — y (т. е. в направлении радиуса факела) в пяти точках с шагом $\Delta y = 2,7$ мм.

На основании локальных измерений вычислялась приведенная функция плотности распределения объема капель по диаметру $v(D)$, которая характеризует дисперсный состав всей совокупности капель, проходящих через рассматриваемый участок площадью F .

В общем виде выражение для расчета значений $v(D)$ можно представить так:

$$v(D_j) = \frac{\int_F \int v(x, y, D_j) g(x, y) dF}{\int_F \int g(x, y) dF}. \quad (3)$$

Для одномерной задачи, как в нашем случае, при численном интегрировании по формуле трапеций выражение (3) преобразуется к виду

$$v(D_j) = \frac{[0,5v(y_1, D_j)g(y_1) + v(y_2, D_j)g(y_2) + \dots + v(y_4, D_j)g(y_4) + 0,5v(y_5, D_j)g(y_5)]\Delta y}{[0,5g(y_1) + g(y_2) + \dots + g(y_4) + 0,5g(y_5)]\Delta y}. \quad (4)$$

Удельный расход g можно установить заборной трубкой. Однако при отработке метода [4] обнаружено, что величину g можно определить с точностью до постоянного коэффициента β по результатам измерения с помощью счетно-импульсного метода, как

$$g = \beta \frac{\pi}{6} \int_0^{\infty} D^3 \varphi_0(D) dD, \quad (5)$$

где $\varphi_0 D$ — ненормированная дифференциальная функция распределения числа капель по диаметру, получаемая в результате обработки опытных данных [7]; $\varphi_0(D) dD$ выражает число зафиксированных капель, которые проходят за 1 сек через 1 мм² в зоне измерения.

Постоянный множитель β можно найти экспериментальным путем, однако в этом нет необходимости, так как он сокращается при вычислении $v(\bar{D})$ по формуле (4).

Измерение удельного расхода жидкости с помощью счетно-импульсного метода не только заметно упрощает определение приведенной функции распределения, но также имеет и самостоятельное значение для изучения структуры дисперсного потока особенно в тех случаях, когда изокINETичный отбор пробы и отвод жидкости из исследуемого рабочего пространства аппарата затруднены.

Графики значений $\bar{v}(D)$ (кривая 1) и соответствующей функции $V(D)$ (кривая 3) приведены на рис. 2. Некоторое отличие значений функций $\bar{v}(D)$ и $V(D)$, полученных с помощью разных методов, можно объяснить указанными неточностями измерения по методу улавливания.

По данным о дисперсном составе капель оценим значение их удельной поверхности l из выражения

$$e = \frac{6}{\rho} \sum_{j=1}^m \frac{\Delta V_j}{D_j} \Delta D_j. \quad (6)$$

Для удельной поверхности, рассчитанной на основании результатов измерения, полученных сравниваемыми методами, отличие находится в пределах 15%. Как известно, погрешность любого метода исследования, основанного на статистическом анализе, определяется величиной допустимой ошибки измерения и степенью надежности, выражающей статистическую обоснованность получаемых результатов. На погрешность измерения счетно-импульсным методом влияют в основном два фактора, во-первых, ошибка в измерении устанавливаемого расстояния между концами электродов, во-вторых, величина допускаемой ошибки при нахождении значений частоты замыканий.

Рассмотрим, как сказываются эти факторы на относительной погрешности оценки параметра дисперсности α [4] в зависимости от крупности капель в исследуемом потоке. Согласно [4, 7] функцию распределения капель $v(D)$ опишем однопараметрической зависимостью, что намного упрощает обработку опытных данных и анализ получаемых результатов.

Очевидно, что наибольшая относительная ошибка K в определении параметра α , возникающая при аппроксимации экспоненциальной зависимостью экспериментальных значений частоты замыканий $h(S)$ [4], имеет максимальное значение, когда при минимальном зазоре $S=0,01$ мм и зазоре, равном максимальному диаметру капель (соответствующему значению $V(D)=0,95$), знак абсолютной ошибки будет противоположным.

В качестве прибора, показывающего относительное перемещение электродов, нами использован индикатор часового типа, обеспечивающий измерение зазора S с точностью до 5 мкм. В этом случае погрешность из-за ошибки в измерении зазора достигает максимального значения, равного 7%, при исследовании капельного потока, характеризуемого модальным диаметром $D_m=0,05$ мм (рис. 3, кривая 1). Погрешность из-за допускаемой ошибки Δh в определении средней частоты замыканий слабо зависит от дис-

переного состава исследуемого потока капель: для величины $\Delta h = 0,025 h_{\text{ср}}$, принимаемой в наших исследованиях (см. работу [4]), погрешность не превышает 1% (кривая 2), кривые 3, 4 соответствуют значениям $\Delta h/h_{\text{ср}}$, равным 0,05 и 0,1. Суммарная относитель-

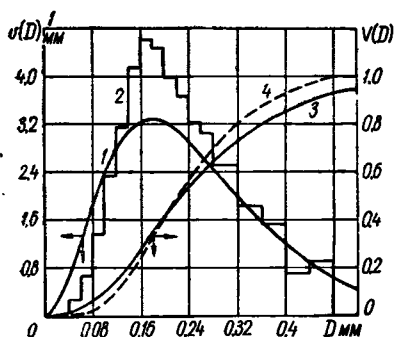


Рис. 2. Дифференциальные $v(D)$ и интегральные $V(D)$ функции распределения объема капель по диаметру.

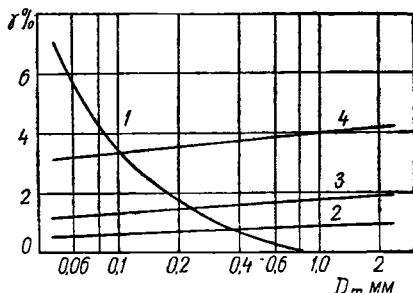


Рис. 3. Погрешности измерения в зависимости от дисперсного состава капель.

ная ошибка при измерении дисперсного состава капель с помощью счетно-импульсного метода в зависимости от принятой точности измерений и тонкости распыливания может находиться в пределах 1—10%.

Таким образом, сравнение результатов измерения двумя методами и проведенный анализ погрешностей измерения показывают достаточно высокую достоверность результатов, полученных с помощью счетно-импульсного метода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виск М., Даклер А. Новый метод измерения распределения размеров капель электропроводной жидкости в двухфазном потоке. — В кн.: Достижения в области теплообмена. М., 1970, с. 177—187.
2. Хьюитт Дж., Холл-Тейлор Н. Кольцевые двухфазные течения. М., «Энергия», 1974. 407 с.
3. Братута Э. Г., Переселков А. Р. К вопросу о новом методе измерения размеров капель. — В кн.: Энергет. машиностроение. Вып. 18. Харьков, 1974, с. 130—136.
4. Леончик Б. И., Маякин В. П. Измерения в дисперсных потоках. М., «Энергия», 1971. 248 с.
5. Глушков В. И. Исследование структуры влажного пара в турбинных решетках. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. М., 1971, с. 24—27.
6. Митропольский А. К. Техника статистических наблюдений. М., «Наука», 1971. 12 с.
7. Братута Э. Г., Переселков А. Р. Расчет функции распределения капель по размерам при использовании счетно-импульсного метода. — «ИФЖ», 1974, т. XXVII, № 5, с. 923—924.